



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사학위논문

레이저 유도 플라즈마 분광 장치를 이용한 액체
연료 화염 특성 연구

A study of liquid-fueled flame using a portable
laser-induced plasma spectroscopy device

2017년 8월

서울대학교 대학원

기계항공공학부

김 현 우

레이저 유도 플라즈마 분광 장치를 이용한 액체 연료 화염 특성 연구

A study of liquid-fueled flame using a portable
laser-induced plasma spectroscopy device

지도교수 여 재 익

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함

2017년 4월

서울대학교 대학원

기계항공공학부

김 현 우

김현우의 공학석사 학위논문을 인준함

2017 년 6 월

위 원 장 정 인 석

부위원장 여 재 익

위 원 윤 영 빈

초 록

본 논문에서는 레이저 유도 플라즈마 분광(laser-induced plasma spectroscopy, LIBS) 신호를 이용하여 이상상태 유동 내 레이저 점화 확률을 파악하고, 유동의 특성을 실시간으로 측정할 수 있는 장비를 제작하였다. 연료에서 발생하는 C_2 분자 신호의 세기가 증가할수록 레이저 점화 확률이 증가한다는 결과를 보여주었고 이를 이용하여 레이저 점화 확률이 가장 높은 위치를 찾을 수 있는 피드백 알고리즘을 구상하였다. 또한 ICCD카메라와 분광기와 같은 일반 LIBS 장비를 사용하는 대신 포토다이오드와 밴드패스 필터로 구성된 새로운 LIBS 장비를 개발하였다. H와 O 신호를 측정하기 위해 $656\text{ nm} \pm 10\text{ nm}$ 와 $780\text{ nm} \pm 10\text{ nm}$ 밴드패스 필터를 이 장비에 장착하였다. 플라즈마 발생 초기에 발생하는 강한 continuum 신호를 제외하기 위해 레이저 펄스 후 250 ns부터 1 μ s 사이에 있는 신호를 이용하여 H 신호와 O 신호의 세기를 계산하였다. H/O 세기비와 연료 혼합물의 당량비의 관계를 이용하여 선형 보정곡선을 확립하였고 이를 이용하여 스프레이 화염 내 당량비를 측정하였다. 이러한 장비는 엔진에 장착되어 극한의 연소 조건을 실시간으로 파악할 수 있는 새로운 방법으로 사용될 수 있다.

주요어 : 레이저 유도 플라즈마 분광 (LIBS), 레이저 점화 확률, LIBS plug, plasma emission

학번 : 2015-22734

목 차

초 록	i
목 차	ii
표 목차	iv
그림 목차	iv
 제 1 장 서 론	 1
 제 2 장 피드백 제어를 위한 이상상태 유동 내 LIBS 분석 및 점화 확률	 3
2.1 실험 방법	3
2.2 실험 결과 및 분석	5
2.2.1. 스프레이 화염 구조 mapping	5
2.2.2. 스프레이 내 LIBS 신호와 레이저 점화 확률	8
2.2.3. 피드백 알고리즘	13
 제 3 장 소형 LIBS plug을 통한 이상상태 유동 특성 연구	15
3.1 실험 방법	15
3.1.1. LIBS plug	15
3.1.2. 확장된 실험 구성	16
3.2 실험 결과 및 분석	19
3.2.1. LIBS 신호 분석	19
3.2.2. 포토디텍터를 이용한 LIBS 신호 분석	25
3.2.3. LIBS plug를 이용한 이상상태 유동 특성 파악	32

제 4 장 결론	34
참고문헌	35
Abstract	38

표 목차

표 1	Bandpass filter specification	17
-----	-------------------------------------	----

그림 목차

그림 2.1	휘발유 스프레이에서 시행한 LIBS 실험 도식	3
그림 2.2	휘발유 스프레이에서 발생한 LIBS 신호	5
그림 2.3	LIBS 신호를 이용한 휘발유 스프레이 화염 mapping (a) H/O, (b) CN	6
그림 2.4	휘발유 스프레이의 레이저 점화 확률 분포	8
그림 2.5	점화 성공 및 실패에 따른 C ₂ 신호 분포도. 높이 (a) 5 mm (b) 10 mm (c) 15 mm (d) 20 mm	10
그림 2.6	레이저 점화 확률과 C ₂ 신호 관계 높이 (a) 5 mm (b) 10 mm (c) 15 mm (d) 20 mm	11
그림 2.7	유동 특성을 조절하기 위한 피드백 알고리즘	13
그림 3.1	새롭게 개발한 LIBS plug	15
그림 3.2	LIBS plug 개략도	15
그림 3.3	밴드패스 필터와 포토디텍터를 이용하여 이상상태 유동 특성을 측정하는 실험 구조	17
그림 3.4	휘발유-공기 혼합물에서 측정된 LIBS 신호 (H : 656 nm, O : 777 nm, N : 747 nm)	20
그림 3.5	다양한 레이저 에너지에서 지연 시간에 따른 LIBS 신호 변화 (a) H 신호 (b) O 신호	21
그림 3.6	다양한 당량비를 갖는 휘발유-공기 혼합물에서 일대일	

비교한 일반 LIBS 신호와 포토디텍터 신호	23
그림 3.7 공기 내에서 측정한 포토디텍터 신호	
(a) H 신호 (b) O 신호	26
그림 3.8 다양한 당량비의 휘발유-공기 혼합물 내에서 측정한	
포토디텍터 신호 (a) H 신호 (b) O 신호	28
그림 3.9 당량비에 따른 포토디텍터 신호 세기 변화	
(a) H 신호 (b) O 신호	29
그림 3.10 (a) 혼합물 당량비 0.92 ~ 5.18 범위 내에서 당량비에	
따른 H/O 세기 비의 보정곡선	
(b) 다양한 혼합물 당량비에서 측정한 단일 레이저	
펄스에 대한 H/O 세기 비의 분포도	31
그림 3.11 스프레이의 다양한 위치에서 측정한 결과	
(a) LIBS plug 로 측정한 당량비, (b) 점화 확률	33

제 1 장 서론

연료 혼합물을 연소시키기 위한 점화 방법은 연소 분야에서 가장 기본적인 사안 중 하나이다. 점화는 연소를 시작하는 단계이기 때문에 가스 터빈이나 자동차 엔진 등과 같은 다양한 연소 시스템에서 가장 중요한 문제가 된다. 점화가 발생하는 위치의 연료 혼합물 분포에 따라 점화 및 연소의 환경이 달라진다. 따라서 점화가 발생하는 위치에서 당량비나 연료 농도와 같은 연료 특성을 측정하는 것이 굉장히 중요하다. 과거에는 스파크 plug 이온 센서(spark plug ion sensor)나 산소 농도 센서 등을 장비에 직접 부착하여 연료의 특성을 파악하였다 [1]. 그러나 이러한 센서 장비를 설치하기 위해서는 복잡한 설계가 필요하고 연료 농도를 측정할 수 있는 위치가 제한적이라는 많은 한계들이 존재한다. 이러한 한계를 극복하여 반응 유동의 특성을 파악하기 위해서 많은 레이저 진단 기법이 사용될 수 있다. 다양한 레이저 진단 기법은 다른 센서들과 다르게 위치적 제한성, 복잡성, 효율성 등에서 장점들을 가지고 있기 때문이다.

레이저 진단 기법 중 레이저 유도 붕괴 분광법 혹은 레이저 유도 플라즈마 분광법 (Laser-Induced Breakdown Spectroscopy, 이하 LIBS)은 많은 상태의 물질에 대해서 실시간으로 특성을 관측할 수 있고 다른 레이저 진단기법에 비해 극한 조건에 견딜 수 있다는 장점들이 존재한다. 이러한 장점들이 있기에 LIBS는 반응유동 내 국소 당량비 [1-10] 와 기체 농도 [11-13] 등을 측정하기 위해 사용되어 왔다. 특히 분광 신호 중에 연료를 대표하는 H 원자 신호와 산화제를 대표하는 C와 O 원자 신호를 측정한 뒤 비율을 계산하여 반응 유동의 특성을 알아내었다. 또한 최근에는 C_2 와 CN 분자 신호를 이용하여 액체 연료의 특성을 측정하는 연구가 진행되었다 [13-15]. 액체 연료의 경우에는 액적의 크기 및 수밀도가 점화 및 연소 상태

를 결정해 주는데 이러한 액적의 특성들이 LIBS 분자 신호와 연관이 있다는 연구 결과를 이용한다면, 결국 LIBS 신호를 이용하여 액체 연료의 점화 및 연소 상태를 파악할 수 있게 된다. 이와 같이 붕괴(breakdown)가 일어난 위치에서의 각 분광 신호의 세기를 측정한다면 국소 당량비나 연료 농도와 같은 반응 유동의 특성을 정량적으로 계산해 낼 수 있다.

일반적으로 LIBS를 측정하는 장비들은 ICCD 카메라와 분광기를 사용한다. 하지만 이러한 장비들은 온도 및 외부 충격에 취약하기 때문에 엔진에 직접 장착되어 LIBS를 측정하는데 한계가 있다. 또한 장비들이 크고 복잡하며 정교하기 때문에 LIBS가 레이저 진단기법이라 하더라도 분광신호를 받아들이고 데이터를 처리하는 속도가 느릴 수 있다. 초음속, 극초음속 수송체에서는 점화가 실패하게 되면 수송체가 정지하게 되고, 이는 매우 큰 참사를 불러 올 수 있다. 따라서 빠른 유동 내부의 특성을 측정할 수 있는 빠른 측정 기법이 필요하다. 이를 보완하기 위해 일반적인 LIBS 측정 기법보다 더 빠르게 분광 신호를 측정하고, 엔진에 직접 부착하여도 크게 취약하지 않은 장비를 개발하였다.

본 연구에서는 분광기 대신 밴드패스 필터(Bandpass filter)를 이용하여 측정하고자 하는 특정 파장을 걸러주었고 ICCD 카메라 대신 포토다이오드(Photodiode)를 이용하여 분광신호를 관측하였다. 분광기 대신 밴드패스 필터를 사용한다면 시스템적으로 파장을 나누지 않고 물리적으로 파장이 걸러지기 때문에 훨씬 간편하고 빠르다. 또한 포토다이오드는 광자가 포토다이오드 단자에 충돌하는 순간 발생하는 전류를 측정하므로 ICCD 카메라보다 훨씬 빠르게 빛의 신호를 측정할 수 있다. 또한 새롭게 구성한 장비들은 기존 LIBS 장비들에 비해 간편하고 가볍고 외부 요인에 영향을 적게 받는다는 장점들이 존재한다.

제 2 장 피드백 제어를 위한 이상상태 유동 내 LIBS 분석

2.1 실험 방법

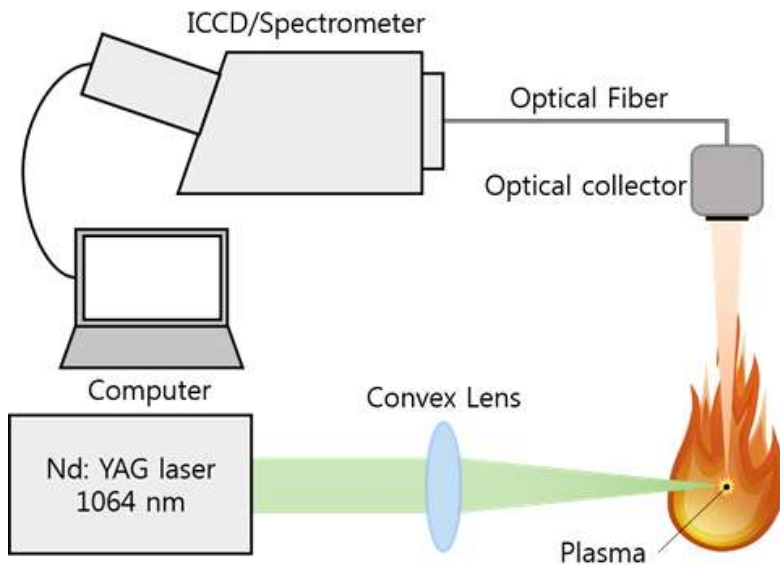


그림 2.1 휘발유 스프레이에서 시행한 LIBS 실험 도식

그림 2.1 은 레이저를 이용하여 연료 스프레이를 점화하고 레이저 유도 플라즈마로부터 발생하는 분광 신호를 측정하기 위한 실험 장치를 나타낸다. 연료는 시중에서 구매할 수 있는 일반 휘발유(C_8H_{18})를 사용하였다. 휘발유를 공기와 섞어 siphon 노즐을 통해 스프레이 형태로 분사하였다. 휘발유는 유량 조절이 가능한 펌프를 통하여 흐르고 압축 공기는 MFC (Mass Flow Controller)를 통하여 분사된다. 분사된 공기는 노즐 안에서 휘발유와 만나 함께 흐르게 된다. 이번 연구에서는 휘발유의 유량은 10 ml/min, 공기의 유량은 10

L/min으로 고정하였다. 노즐 끝단에서 액적의 지름은 20~50 μm 이고 이때 노즐에서의 당량비는 8.9 정도로 측정되었다. 레이저 점화와 LIBS 분석을 하기 위해 1064 nm 파장과 5 ~ 8 ns 펄스 폭을 갖는 Nd:YAG 레이저(Continuum, Surelite I)를 사용하였다. 레이저 에너지는 약 100mJ로 고정하였다. 레이저 빔은 100 mm 초점거리의 렌즈로 집중시켜서 플라즈마를 발생시키고 발생된 플라즈마의 빛은 optical collector를 이용하여 수집하고 분광기(Andor Mechelle 5000)를 거쳐 ICCD(Andor iStar)로 촬영하였다. 촬영할 때 레이저 조사 후 ICCD 노출까지 지연시간은 1 μs 이고 20 μs 동안 ICCD를 노출시켜 촬영하였다. 스프레이 분석을 위해 몇몇의 피크 (H : 656 nm, O : 777 nm, CN : 388 nm, C_2 : 516 nm)만을 살펴보았다. 특히 레이저 점화 특성을 보기 위해 C_2 신호를 중점적으로 분석하였고 데이터의 정확성을 위해 잡음신호를 같이 측정하여 신호 대 잡음비 (Signal to noise ratio, SNR ratio)를 계산하였다. 잡음 신호는 피크가 없고 516 nm와 큰 차이가 없는 파장 범위인 350~380 nm 사이 신호를 평균내서 계산하였다. 이번 연구에서 표시된 모든 C_2 신호는 잡음 신호로 보정된 신호 대 잡음비(C_2 intensity/noise intensity)를 의미한다.

2.2 실험 결과 및 분석

2.2.1 스프레이 화염 구조 mapping

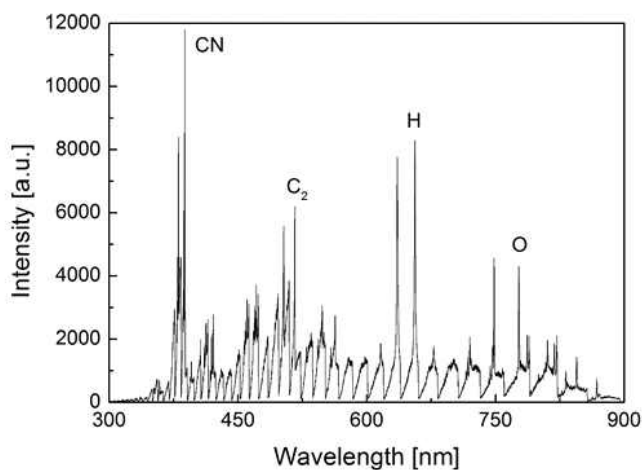
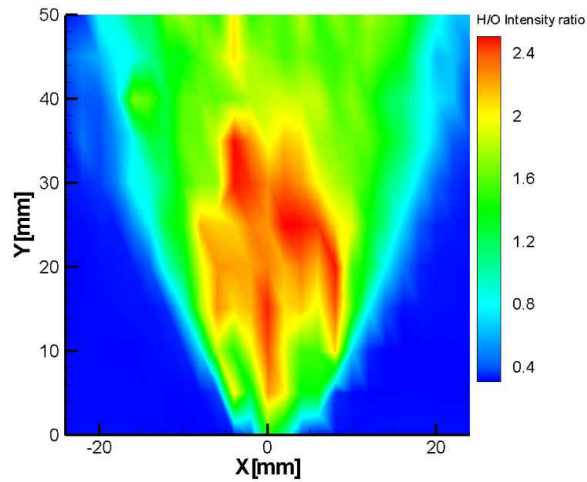


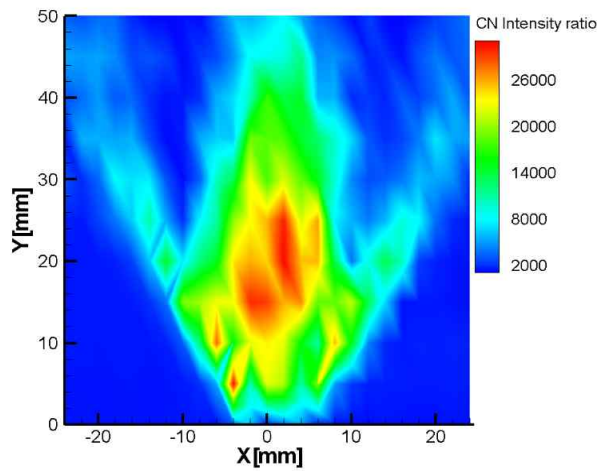
그림 2.2 휘발유 스프레이에서 발생한 LIBS 신호

그림 2.2는 휘발유 스프레이에 레이저를 조사하여 얻은 LIBS 신호를 나타낸 것이다. 레이저 조사 후 약 1 μ s의 지연시간이 흐른 뒤 20 μ s의 gate width동안 측정된 신호들이다. 대표적인 피크 값들만 살펴보면 H Balmer- α (656 nm) 및 O (777 nm) 원자 신호와 CN (388 nm) 및 C₂(516 nm) 분자신호를 살펴볼 수 있다. O 신호는 산화제로 사용된 공기가 붕괴하면서 발생하는 분광 신호이고 C 원자가 포함된 분자 신호들과 H 신호들은 탄화수소인 휘발유 입자들이 붕괴하면서 발생한 신호들이다. 선행연구에 의하면 공기로부터 발생한 O, N 신호는 laser 조사 후 대략 200 ns 지난 후 continuum 신호로부터 분리되어 검출되기 시작한다 [15]. 그리고 레이저 조사 후 1 μ s 지났을 때 신호들이 소멸된다. 하지만 C 원자를 포함한 분자

신호들은 레이저 조사 후 1 μ s 가 지난 후 부터 검출되는데 이는 C
가 포함된 분자들은 플라즈마가 냉각되면서 원자들이 재결합하여
발생하기 때문이다.



(a)



(b)

그림 2.3 LIBS 신호를 이용한 휘발유 스프레이 화염 mapping

(a) H/O, (b) CN

먼저 스프레이 화염의 특성을 알아보기 위해, LIBS를 이용하여 화염의 구조를 관측하였다. 그림 2.3 (a)와 (b)는 각각 H/O 와 CN 신호를 이용한 LIBS mapping을 나타낸다. 노즐 끝단에서부터 수직방향으로 50 mm 높이와 수평방향 양쪽으로 24 mm 인 구간에 대해서 구조를 파악하였다. 수직방향으로 5 mm 간격, 수평방향으로 2 mm 간격으로 위치를 정하고 각 위치마다 40 번씩 레이저를 조사한 후 그 평균을 이용하여 LIBS 신호를 측정하였다. 선행 연구를 보면 H/O 세기 비는 연료의 당량비를 측정하는데 사용되었고 [16] CN band는 연료의 농도를 측정하는데 사용되었다 [17, 18]. 그림 2.3(a)을 보면 H/O 세기 비가 중앙에서 가장 강하고 화염의 위 부분, 유동의 하류 (downstream)에서는 비교적 일정한 값으로 유지되는 것을 볼 수 있다. 그림 2.3(b)를 보면 CN band는 화염의 중앙에서 가장 강하고 바깥 위치에서는 낮게 측정되었다. 이는 연료가 바깥으로 확산이 되기 때문에 이러한 경향성이 나오게 된다. 두 구조가 약간 다른 것을 살펴 볼 수 있다. 스프레이 화염은 액체연료를 사용하기 때문에 액적들이 직접적으로 증발하기 시작하여 확산하면서 연소를 진행하는 속불꽃과 증발하였지만 아직 연소되지 않은 연료들이 추가로 연소가 진행되는 겉불꽃이 존재하기 때문에 mapping 구조가 다르게 관측된다. 속불꽃에서는 증발되지 않은 액적들이 어느정도 존재하기 때문에 CN 신호가 강하게 나오는 반면 겉불꽃에서는 액적들이 모두 기화가 되었기 때문에 CN 신호가 크게 떨어지는 것이다. 그에 비해 H/O 세기 비는 액적의 유무보다는 연료 자체의 유무, 즉 연료 당량비에 영향을 받기 때문에 그림 2.3(a)과 같이 유동의 하류에서 어느정도 일정하게 측정되는 것이다.

2.2.2 스프레이 내 LIBS 신호와 레이저 점화 확률

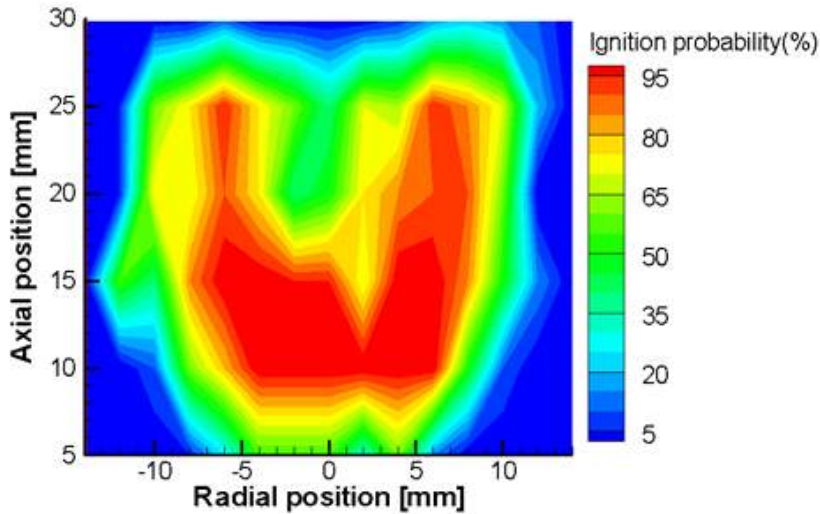


그림 2.4 휘발유 스프레이의 레이저 점화 확률 분포

그림 2.4는 siphon 노즐을 통해 분사한 휘발유 스프레이에서 여러 지점에 대한 레이저 점화 확률을 나타낸 분포도이다. 이 확률 윤곽은 레이저 초점 위치를 수평방향으로 2 mm, 축방향으로 5 mm 씩 움직이면서 24 mm의 너비와 30 mm의 높이에 대해 측정하였다. 각 지점에서 40 번씩 레이저를 조사하여 반복하였다. 이번 연구에서는 레이저 유도 플라즈마를 통해 화염핵 (flame kernel)이 생성되고 이로 인해 안정적인 화염이 생성되었을 경우를 점화 성공으로 정의하였다. 레이저 유도 플라즈마로 인해 화염핵이 생성되었더라도 화염핵의 크기 및 지속시간이 충분하지 않아 화염이 생성되지 않을 수 있다. 같은 지점에 레이저를 조사하여도 시간에 따라 액적의 수밀도가 완전히 균일하지 않기 때문에 화염핵의 형태가 조금씩 달라지기 때문이다. 그림 2.4에서 보면 노즐 팁 바로 위에서는 점화확률이 낮고 노즐 팁으로부터 5 mm 높이에서부터 점화가 성공적으로 일어난다. 이러한 이유는 화염핵이

만들어지더라도 주위의 연료가 너무 농후해서 화염핵으로부터 전달받은 열로 인해 연료가 충분히 증발되지 않기 때문이다. 또한 점화 확률이 노즐 중앙 부분보다 수평방향으로 5 ~ 7 mm 정도 떨어진 부분에서 점화가 더 잘 일어나는 것을 볼 수 있다. 그리고 노즐로부터 대략 30 mm 위에 존재하는 하류에서도 점화가 일어나지 않는 것을 볼 수 있는데 이는 화염핵이 충분한 시간동안 발생하더라도 노즐방향으로 연소파가 전달되지 않아 화염을 만들지 못하기 때문이다.

노즐로부터 서로 다른 4 가지 높이에서 수평 방향으로 여러 지점에 레이저를 조사하여 얻은 C_2 신호 세기 분포가 그림 2.5에 묘사되었다. 그림 2.5 (a), (b), (c), (d)는 노즐에서부터 각각 5mm, 10mm, 15mm, 20mm 높이에서 수평방향으로 다양한 지점에 레이저를 조사했을 때 점화가 실패한 경우와 성공한 경우 C_2 세기를 나타낸 분포도이다. 실패한 경우를 살펴보면 C_2 신호 세기가 각각 20 ~ 30, 20 ~ 30, 25 ~ 40, 20 ~ 35에 주로 분포해 있는 것을 볼 수 있다. 점화가 실패하는 경우에는 레이저를 여러 번 조사하여도 C_2 신호 세기가 큰 변화 없이 대부분 50 이하의 값을 갖는 것을 볼 수 있다. 그에 비해 레이저 점화가 성공한 경우를 보면 C_2 신호 세기가 50 이상의 다양한 값을 갖는 것을 볼 수 있다. 이는 레이저 점화가 성공적으로 일어날 때는 점화가 일어나지 않을 때에 비해 C_2 신호가 높은 값을 갖는다는 것을 의미한다. 특히 점화가 일어나지 않는다는 것은 플라즈마 volume 안에 액적의 밀도가 낮아 연소를 자발적으로 진행시킬 충분한 화염핵이 만들어지지 않는다는 것을 의미한다.

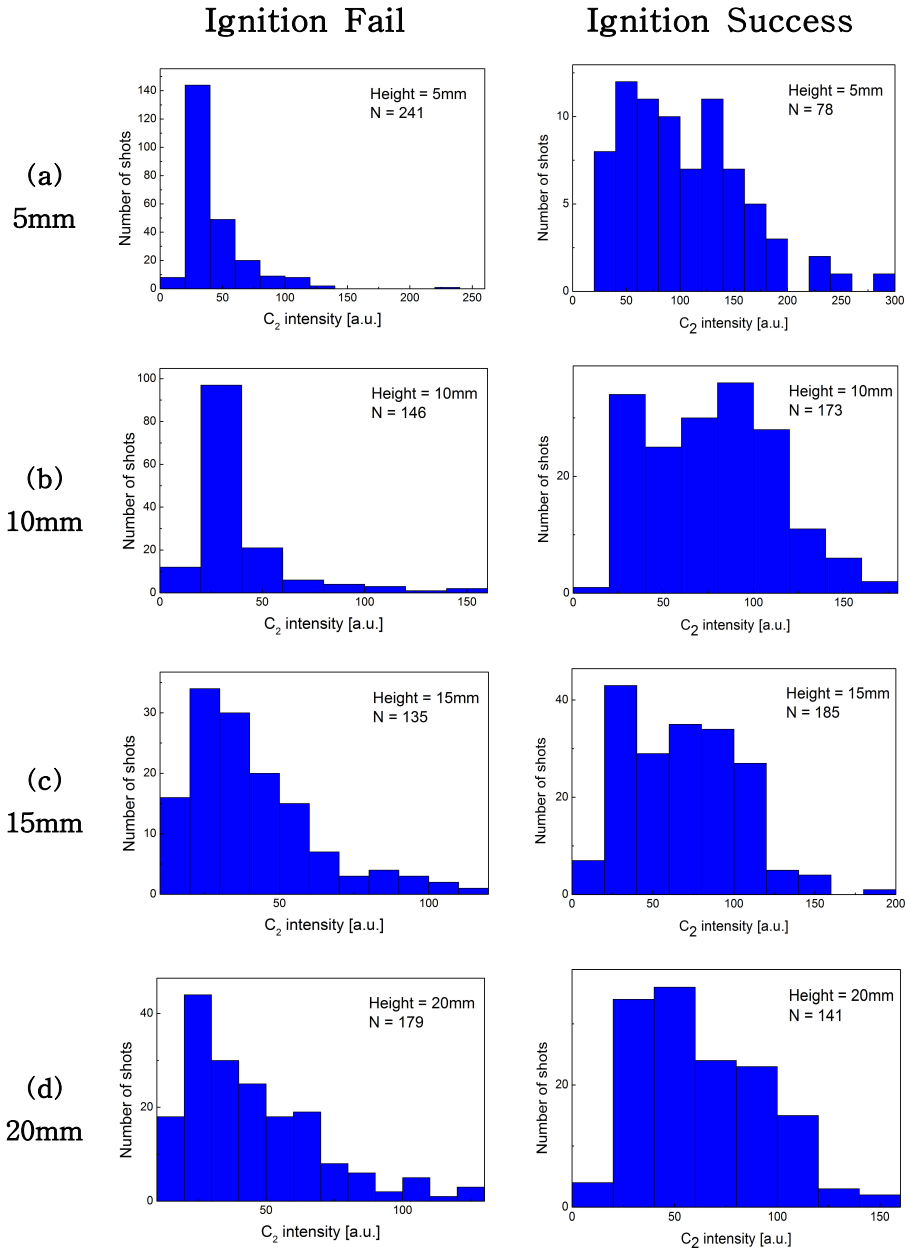


그림 2.5 점화 성공 및 실패에 따른 C_2 신호 분포도.
 높이 (a) 5mm, (b) 10mm, (c) 15mm, (d) 20 mm

즉 레이저로 인해 붕괴된 연료 액적이 충분하지 않아 화염핵의 크기와 지속시간이 작은 것이고 이러한 현상이 작은 C_2 신호로 나타나는 것이다. 플라즈마 볼륨 안에 액적의 밀도가 충분히 크다면 점화를 일으킬 만한 화염핵이 만들어진다. 즉 특정 값 이상의 액적 수밀도가 플라즈마 volume 안에 존재한다면 레이저 점화가 일어나게 되고 거기서 측정된 C_2 신호는 점화가 안 될 때에 비해 다양한 값을 갖는 것이다.

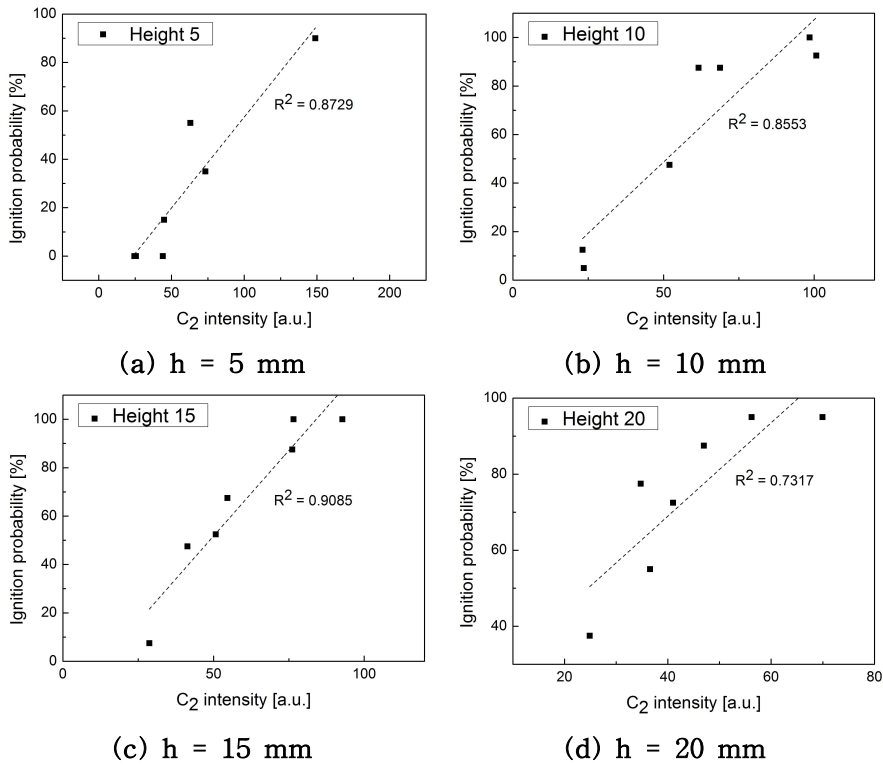


그림 2.6 레이저 점화 확률과 C_2 신호 관계
높이 (a) 5 mm, (b) 10 mm, (c) 15 mm, (d) 20 mm

그림 2.5 결과로부터 점화 유무에 따라 C_2 신호 세기 분포가 달라진다는 것을 알았기 때문에 C_2 신호 세기와 점화 확률을 비교해 보았다. 그림 2.6은 4 가지 높이에 대해서 x축 방향으로 레이저 초점위치를 (focal point) 변화시키면서 점화확률 및 C_2 신호의 세기관계를 나타낸 그래프이다. 유체의 유동 속도나 연료의 증발률 등 외부 요인을 최소화시키기 위해 같은 높이에서 점화확률과 LIBS 신호를 측정하였다. 그림 2.6은 각각 노즐 팁으로부터 5 mm, 10 mm, 15 mm, 20 mm 높이에서 레이저 점화 확률 및 분광신호를 측정한 그래프이다. 높이 5 mm, 10 mm, 15 mm, 20mm 일 때 각 선형 그래프의 결정계수는 0.8729, 0.8553, 0.9085, 0.7317을 갖는다. 모든 그래프에서 C_2 신호가 클수록 점화 확률이 높다는 경향성을 보여준다. 선행논문에 의하면 C_2 신호는 연료의 액적 크기와 액체 연료부피 비와 선형 관계를 나타낸다 [15]. 즉 그림 2.6은 레이저 초점 위치에서의 액적 크기와 액체 연료 부피비가 높은 곳에서 점화가 잘 이루어진다는 것을 의미한다. 레이저로 인해 발생한 플라즈마 부피 내에 있는 액적의 수밀도가 크다면 더 강렬한 화염핵을 만들 수 있게 되고 이 화염핵은 주변 연료를 연소시킬 수 있는 에너지와 열을 전달 할 수 있는 충분한 시간을 갖게 되어 점화 확률을 높여준다. 기존에는 레이저 점화 확률을 높이기 위해 다양한 센서를 이용하여 유동의 압력 및 온도를 측정한 후 점화 위치를 조절하였지만 이 결과를 이용한다면 LIBS 신호만을 이용하여 점화 확률이 높은 레이저 초점 위치를 찾을 수 있다.

2.2.3 피드백 알고리즘

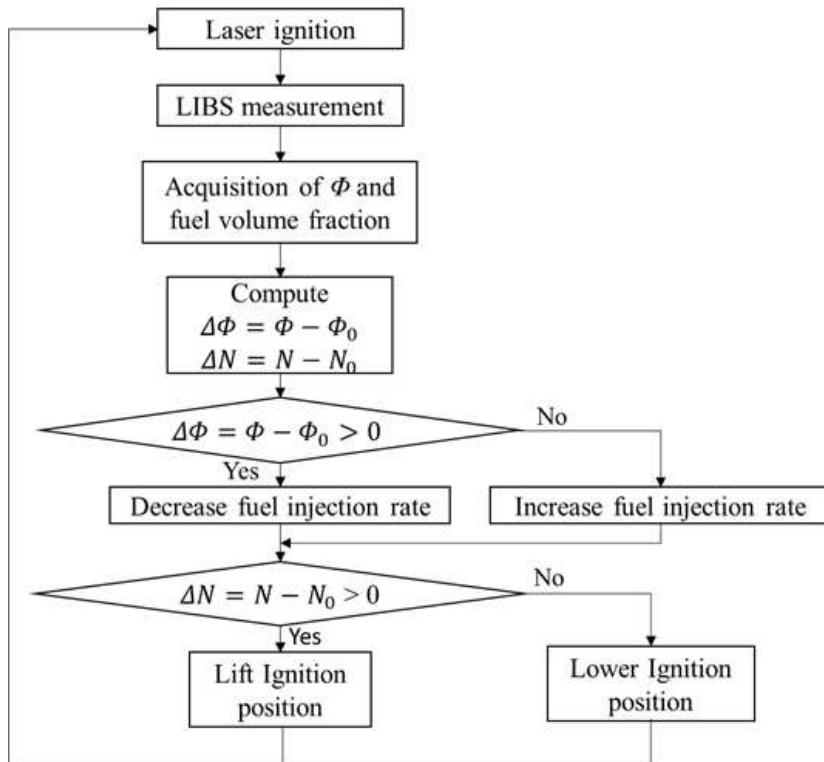


그림 2.7 유동 특성을 조절하기 위한 피드백 알고리즘

이번 연구 결과를 이용한다면, 레이저 유도 플라즈마 분광 신호를 이용하여 점화 효율을 높이거나 반응 유동의 특성을 조절할 수 있는 피드백 제어 시스템을 제시할 수 있다. 레이저 점화와 동시에 진행되는 분광 신호 측정은 반응 유동 내 국소 당량비 및 연료 농도를 빠르게 결정할 수 있다. 이 기술을 사용하여 스프레이 화염 안정화 공정 및 엔진 내부에 전파되는 반응 유동 특성을 측정할 수 있다. 또한, 다양한 환경 내에서 얻어진 실험 데이터들은 실제 엔진 내부에서 연료 분사 속도/위치와 최적의 점화 위치에 대한 실질적인 정보를 제공 할 수 있다. 그림 2.7은 점화 확률과 크게 연관되어

있는 당량비 및 액적 특성과 같은 연료 특성을 사용하는 피드백 제어 시스템의 알고리즘을 의미한다. 이렇게 순간적으로 변하는 유동 특성을 감시하고 있으면 내부 엔탈피 변화를 살펴볼 수 있다. 특히 연소 반응을 위해 엔탈피가 불충분한 초기 엔진 작동 기간에 이 시스템이 적합할 수 있다. 여기서 제안된 알고리즘은 측정된 당량비에 따라 연료 분사량을 조정한다. 또한, 액적 특성이 점화 조건에 적합하지 않을 때 점화 위치를 조절 할 수 있다. 액체 연료 부피 비도 그림 2.7에 도시된 바와 같이 스프레이 내 점화 위치에 따라 변한다. 따라서 이 알고리즘은 점화 위치를 조정하여 최적의 엔진 연소 조건을 만들 수 있다. 이 시스템이 엔진에 탑재된 후 내부 유동에 대한 실시간 정보를 지속적으로 모니터링한다면 제어 루프로 피드백하여 내부 반응 유동의 혼합 과정을 개선하고, 또한 불필요한 화학종 및 연소 불안정성을 최소화하여 엔진 성능 저하를 방지 할 수 있다.

제 3 장 소형 LIBS plug를 통한 이상상태 유동 특성 연구

3.1 실험 방법

3.1.1 LIBS plug



그림 3.1 새롭게 개발한 LIBS plug

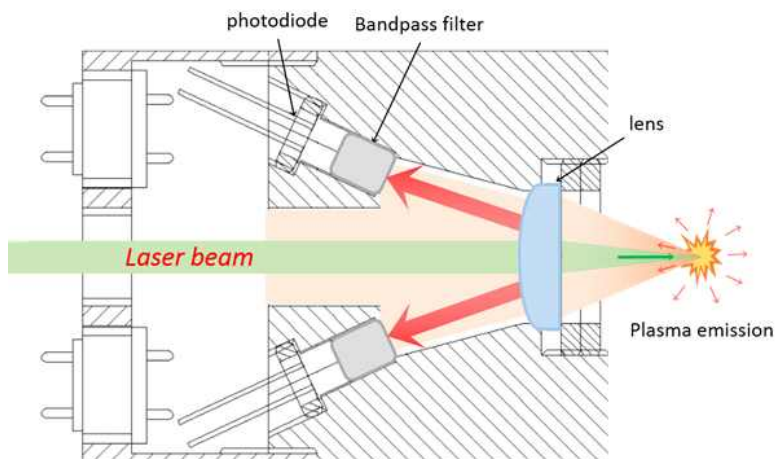


그림 3.2 LIBS plug 개략도

LIBS를 사용하여 연료 특성을 결정할 때 당량비는 일반적으로 H 및 O 원자 신호로부터 얻어진다. 따라서 이번 연구에서 제작한 LIBS plug는 H 원자 신호와 O 원자 신호에 해당하는 파장을 통과시키는 밴드패스 필터를 사용하여 연료의 당량비를 결정할 수 있도록 개발되었다. 그림 3.1은 이 plug의 실제 사진이고 그림 3.2는 plug의 단면도를 나타낸다. H 원자 신호와 O 신호를 얻기 위해 중심 파장 (CWL)이 각각 656 nm 및 780 nm 이고 10 nm의 반치폭 (Full Width Half Maximum, FWHM)을 갖는 밴드패스 필터가 사용되었다. 2 개의 밴드패스 필터의 직경은 모두 12.5 mm이고 최소 투과율은 50 %이다. UV plano 볼록 렌즈를 사용하여 레이저 빔을 집광시키고 플라즈마 방출 빛을 수집하였다. 볼록 렌즈의 직경은 15 mm이고 초점 길이는 25 mm이다. Si 포토다이오드 (FDS010, Thorlabs)를 사용하여 플라즈마 방출 빛의 신호를 측정하였다. 포토다이오드의 rise time은 1 ns 이고 파장 730 nm 빛에 대해서 피크 응답도는 0.44 A/W이다. 장치의 소형화를 위해 레이저 빔과 수집되는 플라즈마 방출 빛의 경로가 동일하도록 디자인 되었다. 수집된 플라즈마 빛 신호를 전송하기 위해 plug를 BNC 케이블로 연결했다.

3.1.2 확장된 실험 구성

LIBS plug의 실용성을 확인하기 위해 분광기와 ICCD 카메라 대신에 밴드패스 필터와 포토디텍터를 이용하여 실험을 진행하였다. 플라즈마 방출 빛은 밴드패스 필터 B1 및 B2 (각각 656 ± 10 nm 및 780 ± 10 nm, 표 1)를 사용하여 수소 및 산소 원자 신호에 해당하는 파장을 추출한 후 포토디텍터 (Thorlabs, DET10A / M)를 사용하여 측정되었다. 측정된 플라즈마 방출 빛은 오실로스코프 (Teledyne LeCroy, WAVESURFER)를 사용하여 검출되었다.

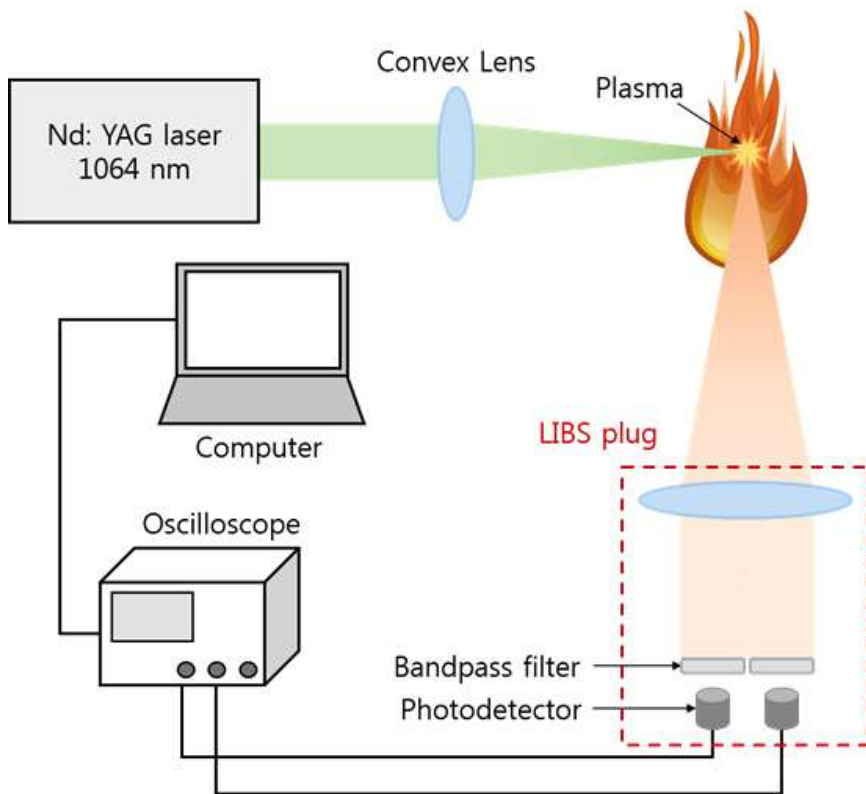


그림 3.3 밴드패스 필터와 포토디텍터를 이용하여 이상상태
유동 특성을 측정하는 실험 구조

표 3.1 Bandpass filter specification

Bandpass Filter	Center Wavelength	Full Width Half Max
B1	656 nm	10 nm
B2	780 nm	10 nm

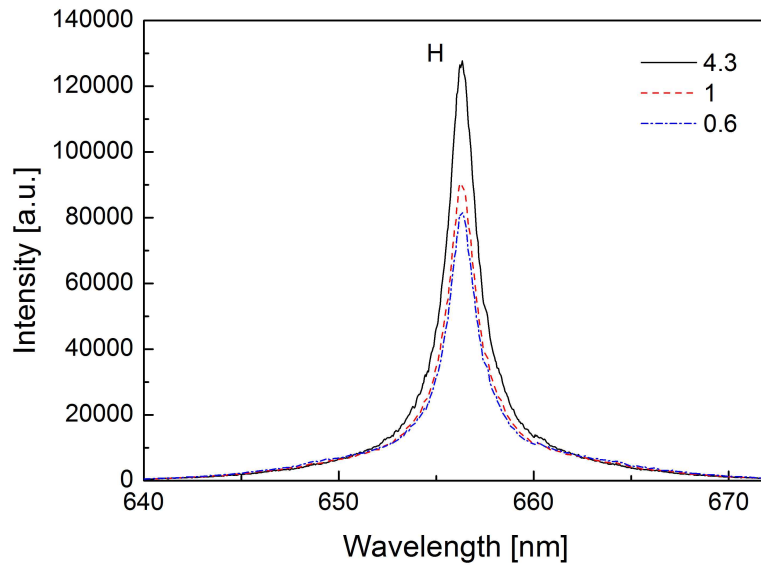
이 신호의 타당성을 확인하기 위해 포토디텍터로 분광 신호를 측정함과 동시에 2.1 파트와 동일한 조건의 일반 LIBS 실험 장비로 분광 신호를 측정하였고, 동시에 측정한 신호를 일대일 비교하였다. 분광 신호의 단순 비교를 위해 포토디텍터를 이용하여 두 개의 피크 (H : 656 nm, O : 777 nm)만 확인하였다. 균일한 액적이 존재하는 휘발유-공기 혼합물에 LIBS 실험을 진행하여 분광신호와 당량비의 관계를 나타내는 보정 곡선을 만들었다. 균일한 액적은 진동 세라믹 판을 가진 분무기에 의해 생성되었다. 분무기에 주입되는 연료 유량은 3 ml/min 으로 고정하였고 공기 유량을 6 ~ 28 L/min 으로 변화시키면서 혼합물의 당량비를 조절하였다.

3.2 실험 결과 및 분석

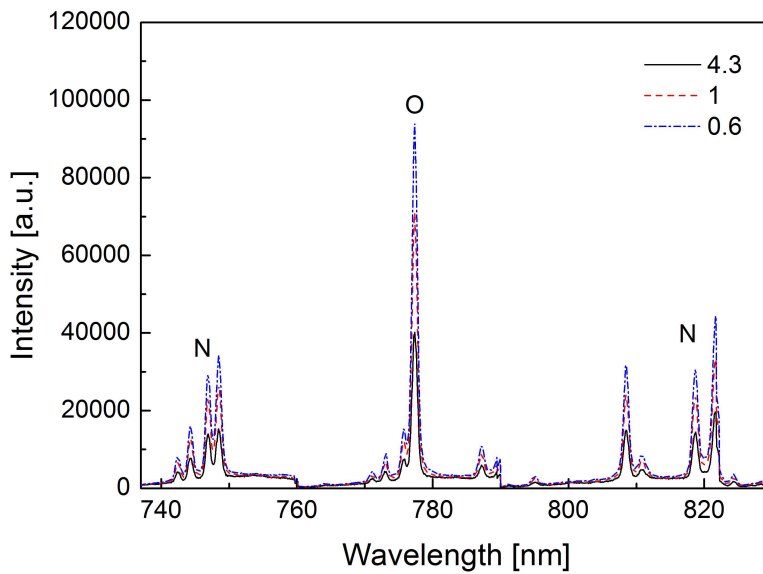
3.2.1 LIBS 신호 분석

그림 3.4는 다양한 당량비 (4.3, 1, 0.6)의 휘발유-공기 혼합물 내에서 일반 LIBS 실험을 통해 얻은 신호들이다. 이 신호들은 레이저 펄스 후 1 μ s의 지연 시간이 지난 후 20 μ s의 gate width 동안 측정되었다. 각 신호의 피크 값들을 보면 H Balmer- α , O I, and N I 원자 신호들이 나온다. O와 N 신호들은 산화제로 사용된 공기의 붕괴로부터 발생된 신호이다. H 신호는 탄화수소인 연료 입자의 붕괴로부터 발생한다. 따라서 당량비가 증가할수록 H 원자 피크는 증가한다. 하지만 상대적으로 공기의 양은 줄기 때문에 O와 N 원자 피크는 감소하게 된다. H 신호는 파장 656 nm에서 피크가 있고 O 신호는 777 nm에 피크(777.194 nm, 777.417 nm, 777.539 nm)가 존재한다. 하지만 N 신호는 두 가지 파장 747 nm(746.831 nm, 744.229 nm, 742.364 nm)와 823 nm(824.239 nm, 821.634 nm)에서 피크가 발생한다. 같은 원자 신호에서도 미세하게 다른 파장의 피크들이 발생하는 것을 볼 수 있는데 이는 같은 에너지 층 (energy level)에 서로 다른 축중도 (degrees of degeneracy)가 존재하기 때문이다.

그림 3.5는 휘발유 스프레이에서 3 가지의 다른 레이저 에너지(에너지 50 mJ, 100 mJ, 150 mJ - 변동계수 3.43 %, 2.19 %, 1.48 %)를 사용하여 지연시간에 따른 수소 및 산소 원자 신호의 세기를 나타낸 그래프이다. gate width는 20 μ s로 고정하였고 지연시간은 100 ns에서 1 μ s까지 조절하였다. 두 원자 신호의 세기는 300 ns까지 다소 증가하다가 시간이 흐를수록 신호의 세기는 점점 감소한다.

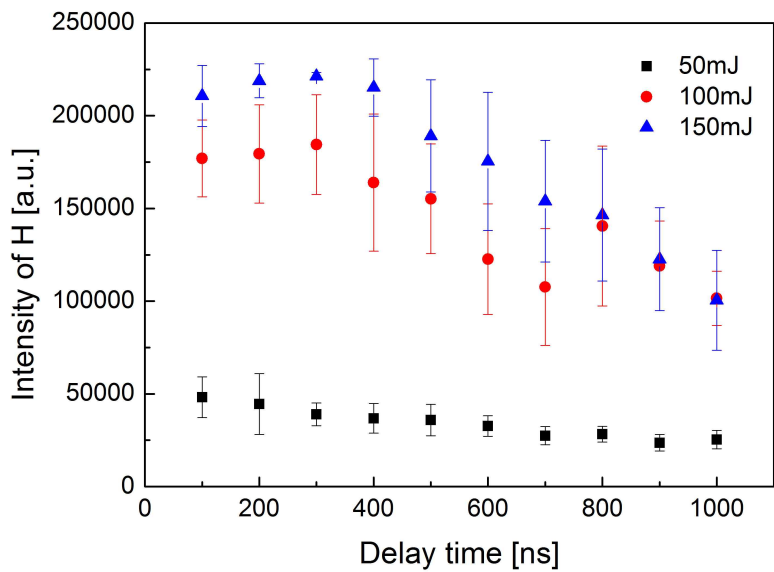


(a)

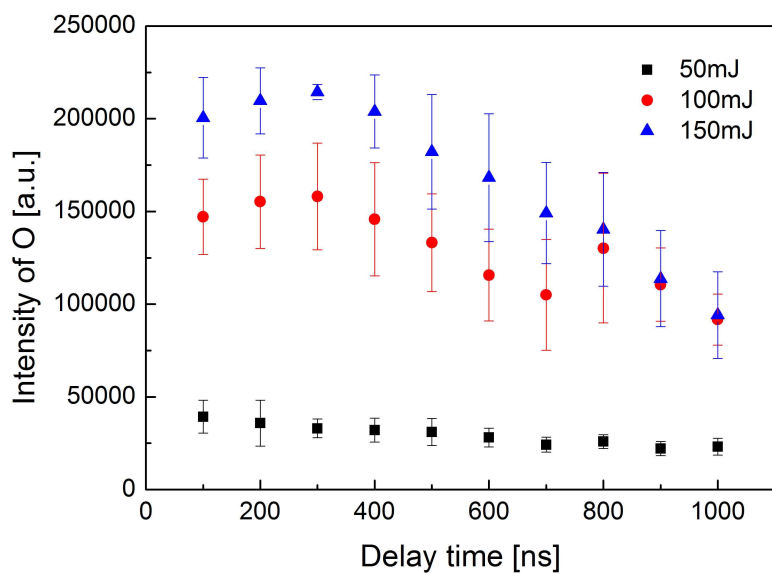


(b)

그림 3.4 휘발유-공기 혼합물에서 측정된 LIBS 신호 (H : 656 nm, O : 777 nm, N : 747 nm)



(a)

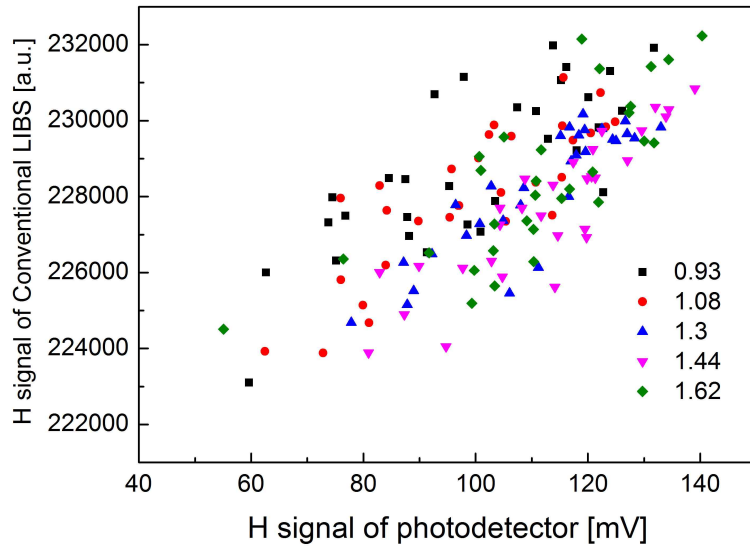


(b)

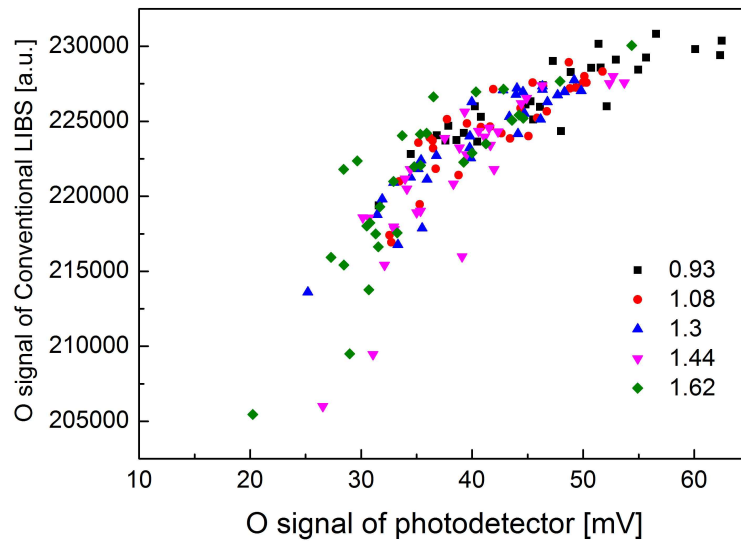
그림 3.5 다양한 레이저 에너지 (50 mJ, 100 mJ, 150 mJ)에서 지연시간에 따른 LIBS 신호 변화 (a) H 신호 (b) O 신호

Kobayashi et al. 는 CH_4 , C_2H_4 , C_3H_8 , C_4H_{10} 혼합물에서 지연시간에 따른 원자 신호의 세기를 비교하였다. H와 O 원자 신호의 세기는 1 μs 까지 점점 감소하는 반면 C 원자 신호는 대략 100 ns 안에 소실되었다. 하지만 이번 연구에서는 원자 신호가 1 μs 이후에 어느 정도 유지되었다. 이는 휘발유 액적에 레이저를 조사하여 더 많은 탄화수소 분자들이 붕괴되었기 때문이다. 또한 선행연구와 레이저 에너지와 카메라 노출 시간 및 ICCD의 신호 증폭 정도가 다르다는 실험적 차이도 있다. 레이저 에너지에 따른 신호를 보면 레이저 에너지가 높을수록 더 강한 LIBS 신호가 검출되고 레이저 에너지가 낮을 때보다 더 천천히 소실된다. 이것은 높은 에너지는 더 강한 플라즈마를 발생시키고 그에 따라 소실시간이 더 길어진다는 것을 의미한다. 그렇기 때문에 레이저 에너지가 작을수록 플라즈마 volume이 작아지고 붕괴되는 휘발유 액적의 개수가 적어지게 된다.

공기 흡입 엔진의 시간 척도는 짧기 때문에 그 내부유동 특성을 파악하기 위해 굉장히 빠른 진단 기법이 필요하다. 예를 들어 SR-71이나 X-51A 엔진 내부유동의 특성시간은 10 ms 에 불과하다. 이 특성시간은 일반적인 센서를 이용하여 유동의 특성을 파악하기에는 매우 짧다. 그에 적합한 것이 레이저 진단 기법이고 특히 플라즈마 빛을 이용할 수 있는 LIBS 기법이 적합하다. 하지만 반응이 진행되는 엔진에 LIBS 장비를 장착하여 분석하기에는 무게, 복잡성, 가격 등 여러 가지 문제점들이 있다. 이러한 문제점들을 보완하기 위해 포토디텍터와 밴드패스 필터를 이용하여 LIBS 신호들을 분석하였다.



(a)



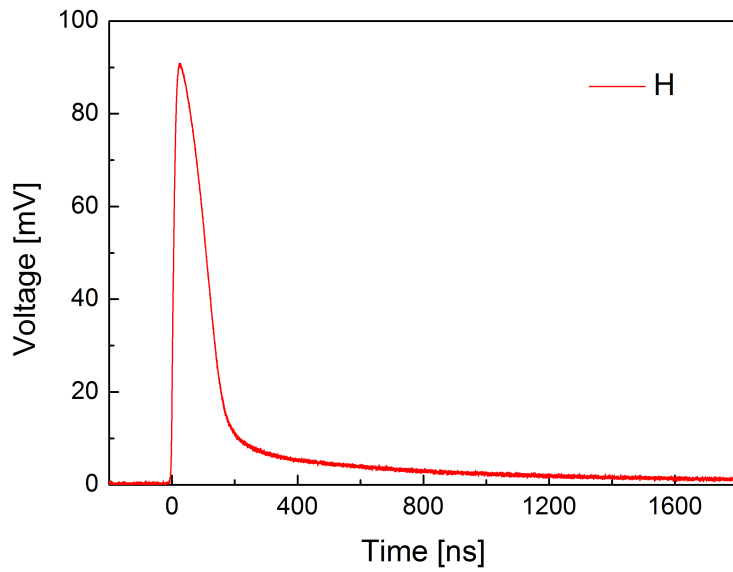
(b)

그림 3.6 다양한 당량비 (0.93, 1.08, 1.3, 1.44, 1.62)를 갖는 휘발유-공기 혼합물에서 일대일 비교한 일반 LIBS 신호와 포토디텍터 신호

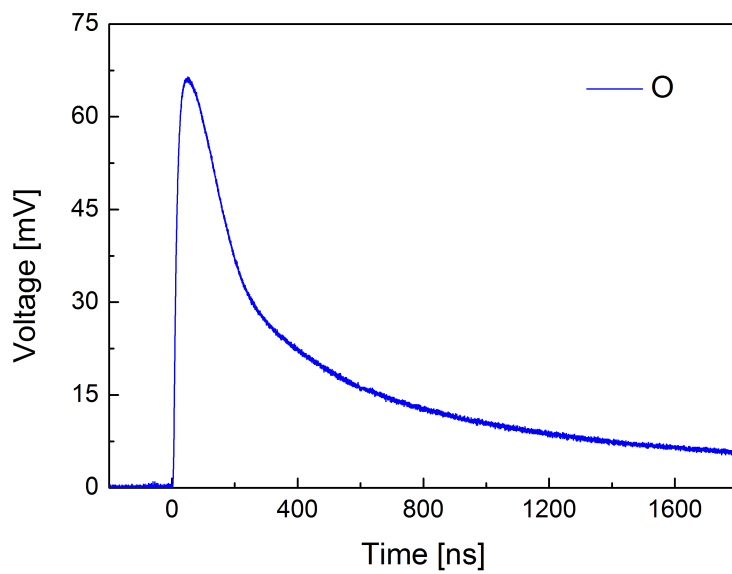
5 가지 당량비 (0.93, 1.08, 1.3, 1.44, 1.62)의 휘발유-공기 혼합물에 대해서 각각 레이저를 30번씩 조사하여 생긴 플라즈마 방출 빛을 일반 LIBS 장비들과 포토디텍터로 동시에 측정한 후 두 신호를 일대일 비교를 하였다. 그림 3.6은 일반 LIBS 장비를 이용하여 측정한 H_{α} (656 nm) 원자 신호 및 O (777 nm) 원자 신호를 포토디텍터 앞에 B1 및 B2 밴드패스 필터를 설치하여 측정한 신호와 비교한 그래프이다. 플라즈마 방출 빛의 세기가 작으면 필터에 상관없이 포토디텍터 신호와 일반 LIBS 신호가 모두 작게 나오고 플라즈마 빛의 세기가 크면 두 신호가 모두 크게 나온다. 그림 3.6을 보면 일반 LIBS로 측정한 H_{α} 원자 신호가 같더라도 당량비가 높을수록 포토디텍터 신호가 약간 높게 측정되는 것을 볼 수 있는데 이는 당량비가 커지면 H_{α} 원자 신호 외에 B1 밴드패스 필터를 통과하는 광대역 방출 빛(broadband emission)이 같이 증가하기 때문이다. 따라서 그래프 분포가 약간 퍼져있는 것이다. 그에 반해 당량비가 변하더라도 B2 밴드패스 필터를 통과하는 광대역 방출 빛은 크게 변하지 않기 때문에 당량비에 상관없이 그래프 분포가 모여있는 것을 볼 수 있다. 또한 당량비가 증가할수록 O 원자의 개수가 줄어들기 때문에 전체적인 신호 값들이 작게 나오는 것을 볼 수 있다.

3.2.2 포토디텍터를 이용한 LIBS 신호 분석

그림 3.7 (a)와 (b)는 각각 공기 중에서 레이저 (100 mJ)를 30번 켜 조사하여 발생시킨 플라즈마 방출 빛을 656 ± 10 nm와 780 ± 10 nm 밴드패스 필터를 이용하여 특정 파장의 빛을 통과시켜 포토디텍터로 측정한 신호이다. 일반 LIBS에서 수소 신호는 656 nm에 피크가 있고 산소 신호는 777 nm에 피크가 있기 때문에 656 ± 10 nm 밴드패스 필터를 통과한 빛에는 수소 원자 신호가 포함되어 있고 780 ± 10 nm 밴드패스 필터를 통과한 빛에는 산소 원자 신호가 포함되어 있다. 플라즈마 발생 초기에 측정된 신호는 플라즈마 background continuum을 의미하는데 continuum은 광대역 범위(broadband line)에 존재하기 때문에 포토디텍터 앞에 밴드패스 필터를 설치하더라도 강한 신호가 측정되는 것이다. 하지만 공기 내에는 수소가 거의 존재하지 않으므로 continuum이 모두 소실된 후 656 ± 10 nm 밴드패스 필터를 통과한 빛은 약 250 ns 이후에 0으로 수렴하는 것을 그림 3.7(a)를 통해 볼 수 있다. 그에 반해 공기 중에는 산소가 존재하기 때문에 continuum이 어느 정도 사라진 후 780 ± 10 nm 밴드패스 필터를 통과한 방출 빛이 존재하는 것을 그림 3.7(b)를 통해 알 수 있다. 즉 필터와 포토디텍터를 이용한다면 플라즈마로부터 발생하는 원자 신호들의 지연시간을 알 수 있다는 것을 확인하였다. 선행연구에서는 포토다이오드를 이용하여 다양한 공기 압력에서 시간에 따른 플라즈마 신호의 변화를 측정하였다 [19]. 1기압일 때 플라즈마 신호는 200 ns 까지 유지되었다.



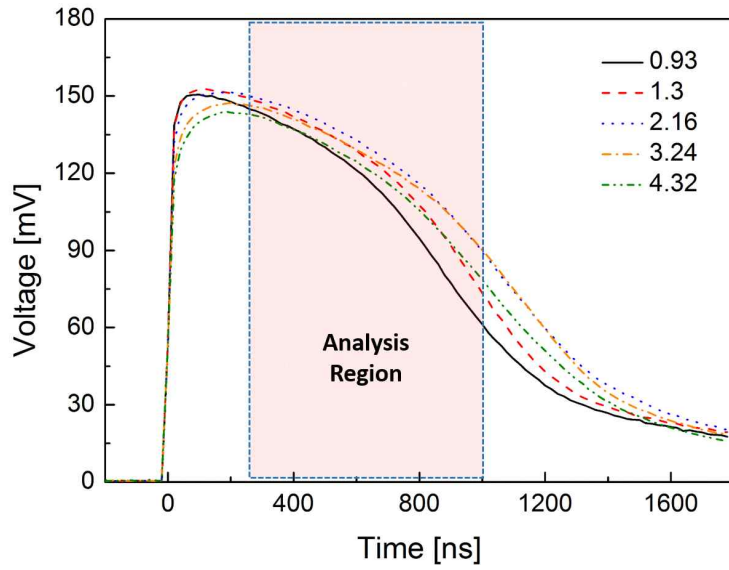
(a)



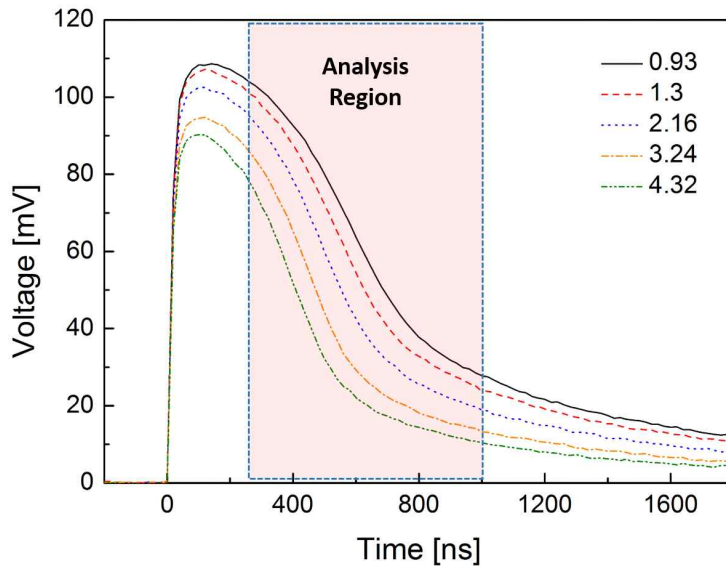
(b)

그림 3.7 공기 내에서 측정한 포토디텍터 신호 (a) H 신호, (b) O 신호

그림 3.8은 휘발유-공기 혼합물 내에서 발생한 플라즈마 방출 빛을 B1, B2 밴드패스 필터로 특정 파장을 통과시킨 뒤 포토디텍터로 측정한 H, O 신호이다. 각 신호는 레이저를 30번 조사하여 얻은 신호의 평균을 이용하여 계산하였다. 그림 3.7 (a)와 그림 3.8 (a)과 비교해보면 두 신호의 형태가 다른 것을 볼 수 있다. 여기서 B1 필터를 통과한 광신호를 나타내는 H 신호는 혼합물 내에서는 긴 시간 동안 남아있게 되지만 공기에서는 수소가 거의 존재하지 않기 때문에 광대역 방출 빛 신호만 나오게 된다. 여기서 의미하는 H 신호는 background 신호에 실제 수소 원자 신호가 더해져서 나타내지는 것이다. 따라서 정확한 수소 신호는 혼합물에서 얻은 신호와 공기에서 얻은 신호의 차이를 이용하여 계산할 수 있다. 그에 비해 그림 3.7 (b)와 그림 3.8 (b)를 비교해보면 산소 신호는 크게 변하지 않는 것을 볼 수 있다. 신호의 절대적인 세기와 소실 시간이 약간 다르지만 전체적인 형태는 변하지 않는다. 이는 공기 내의 산소 농도가 일정하기 때문이다. 그림 3.8(b)을 보면 산소 신호의 세기가 낮아지게 된 것을 알 수 있는데 이는 휘발유-공기 혼합물의 당량비가 높아질수록 단위 부피 당 포함되어 있는 산소가 줄어들기 때문이다. 이 연구를 이용하여 각 원자 신호의 형태가 시간에 따라 어떻게 변하는지 알 수 있음과 동시에 각 원자 신호의 세기를 계산해 낼 수 있다.



(a)



(b)

그림 3.8 다양한 당량비 (0.93, 1.3, 2.16, 3.24, 4.32)의
휘발유-공기 혼합물 내에서 측정된 포토디텍터 신호 (a) H 신호
(b) O 신호

그림 3.7을 보면 플라즈마 background continuum이 대략 250 ns까지 지속된다. 수소와 산소 신호 세기는 그림 3.8에서 250 ns부터 1 μ s까지 범위를 이용하여 계산하였다. 그림 3.9를 보면 H 신호는 당량비에 상관없이 대략 110 mV 로 일정하였지만 O 신호는 당량비가 증가함에 따라 47 mV부터 14 mV까지 선형적으로 감소하였다. 이는 연료 유량은 일정하게 고정한 후 공기 유량을 변화시키면서 당량비를 조절했기 때문이다. 따라서 H 신호는 일정하게 나온 반면 O 신호는 점점 감소하는 것이다.

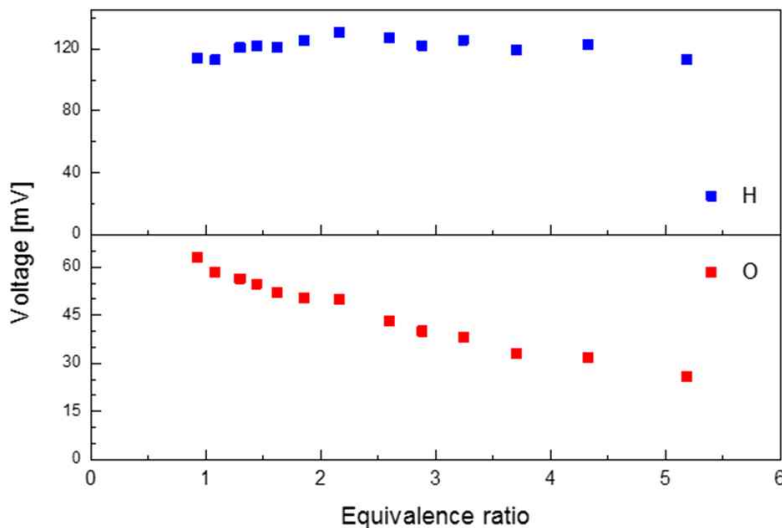
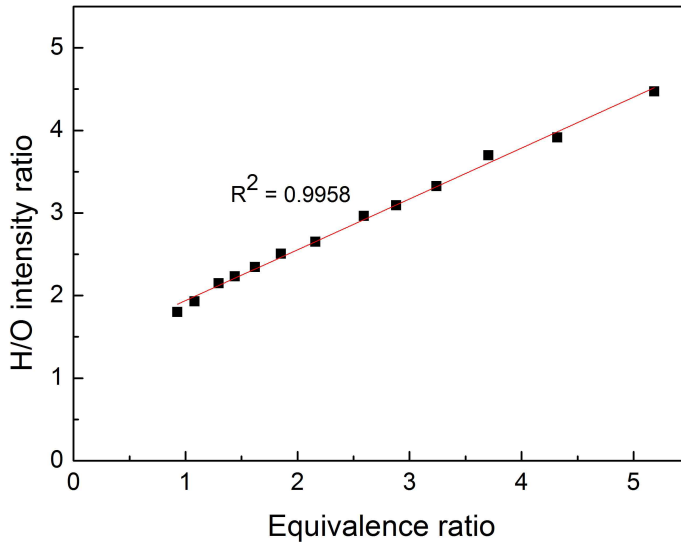


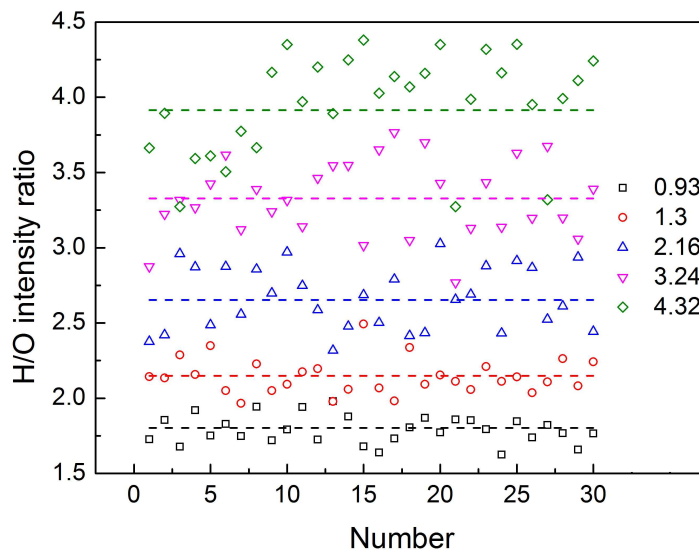
그림 3.9 당량비에 따른 포토디텍터 신호 세기 변화. (a) H 신호, (b) O 신호

그림 3.10 (a)는 밴드패스 필터와 포토디텍터를 이용하여 구한 수소 신호와 산소 신호의 비를 당량비에 따라 나타낸 관계이다. 두 변수는 거의 선형관계이며 0.9958의 결정계수를 갖는다. 선행연구에서는 분광기와 ICCD 카메라를 이용하여 휘발유 액적 내 LIBS 신호를 정량분석하였다 [15]. 이 경우에도 H/O 세기 비와 혼합물의

당량비 사이의 보정곡선을 그려 두 변수가 선형관계임을 밝혔다. 다른 선행 연구에서는 기체 연료 혼합물에서 당량비와 H/O 세기 비가 선형 관계를 갖는 것을 보였다 [2-8]. 이번 연구에서도 이상상태 혼합물의 당량비와 H/O 세기 비가 선형관계의 보정곡선을 갖기 때문에 우리는 이상상태 유동 내에서 밴드패스 필터와 포토디텍터를 이용한 LIBS 분석이 가능하다는 것을 확인 할 수 있다. 실제 환경은 이상적인 경우가 아니기 때문에 레이저 초점 위치에서는 이상상태 유동의 시간적, 공간적 변화가 발생한다. 따라서 밴드패스 필터와 포토디텍터를 이용한 실험의 정확성을 확인하기 위해서는 각 단일 레이저 펄스에 대한 값들을 모두 확인할 필요가 있다. 레이저를 여러 번 조사하여 측정된 분광신호의 평균값은 이상적일지라도 각 신호의 편차가 클 수 있기 때문이다. 그림 3.10 (b)는 H/O 세기 비를 5 가지 당량비에 대해 나타낸 분포도이다. 각 당량비마다 30번의 단일 레이저 펄스에 대해 H/O 세기 비를 측정하였다. 혼합물이 희박 상태이거나 당량비가 1 근처에서는 변동계수 (coefficient of variation)가 6 % 미만으로 편차가 작다. 당량비가 증가할수록 편차가 점점 커지게 되며 당량비가 2.16, 4.32, 그리고 5 이상일 때 각각 변동계수가 8 %, 8.5 %, 그리고 10 % 이상이 된다. 이러한 편차는 레이저 에너지 변화, 플라즈마 온도 등 여러 가지 변수에 의해 발생한다. 하지만 10 %의 편차는 충분히 오차 내 값으로 간주할 수 있기 때문에 이번 연구에서 진행한 당량비 범위에서의 실험값들은 타당하다고 볼 수 있다. Kotzagianni et al. [10]는 난류 메탄 화염에서 H/O 세기 비를 측정하였는데 물 분율이 0.1 이하일 때 H/O 세기 비의 편차가 10 % 이하로 측정되었다. 물 분율이 약 0.3 일 때 편차가 60% 로 측정되었다.



(a)

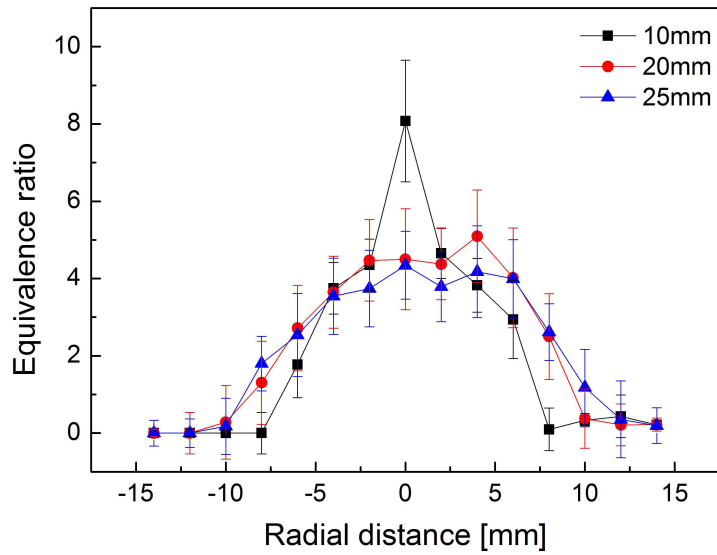


(b)

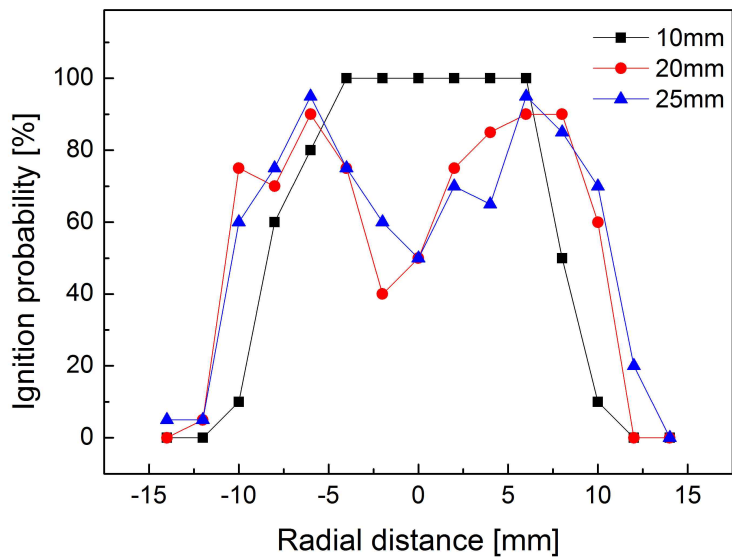
그림 3.10 (a) 혼합물 당량비 0.92~5.18 범위 내에서 당량비에 따른 H/O 세기 비의 보정곡선. (b) 다양한 혼합물 당량비 (0.93, 1.3, 2.16, 3.24, 4.32)에서 측정한 단일 레이저 펄스에 대한 H/O 세기 비의 분포도

3.2.3 LIBS plug를 이용한 이상상태 유동 특성 파악

그림 3.11은 휘발유 스프레이 내에서 각 위치에 대해 40 번씩 레이저를 조사하여 얻은 당량비와 점화 확률이다. 이상상태 유동의 점화 성공 여부는 온도, 액적의 미립화, 유동 속도장, 붕괴가 일어나는 위치의 국소 당량비 등의 요인에 영향을 받는다. LIBS plug를 이용하여 분광 신호를 측정된 뒤 그림 3.10 (a)의 보정곡선을 이용하여 당량비를 계산하였다. 국소 당량비가 점화확률에 크게 영향을 끼치기 때문에 같은 위치에서 점화확률도 같이 측정하였다. 점화 확률은 전체 레이저 스파크 횟수와 점화가 성공한 횟수의 비를 이용하여 측정하였다. 스프레이 노즐로부터 멀어질수록 휘발유 연료 액적은 점점 증발하게 되고 연료 증기는 확산하게 되어 유동의 중심으로부터 멀어질수록 당량비가 약간 증가하게 된다. 그림 3.11 (a)와 (b)를 비교해보면 점화 확률 분포가 국소 당량비와 다소 비슷한 경향을 갖는데 이러한 당량비와 점화확률의 경향성은 일반적인 메탄 제트 확산 화염에서도 볼 수 있다 [5].



(a)



(b)

그림 3.11 스프레이의 다양한 위치에서 측정 한 결과
(a) LIBS plug로 측정 한 당량비, (b) 점화 확률

제 4 장 결론

이상상태 연료 혼합물을 사용하는 극한의 연소 환경에 적용할 수 있는 시스템을 개발하기 위해 LIBS를 이용하여 이상상태 유동의 특성을 파악하였다. 특히 액체 연료와 관계가 있는 C_2 신호를 이용하여 레이저 점화 확률을 나타내었고 이를 이용하여 최적의 레이저 점화 위치를 찾을 수 있는 간단한 피드백 알고리즘을 구상하였다. 그리고 포토다이오드와 밴드패스 필터를 장착한 작은 LIBS plug를 이용하여 플라즈마 빛을 측정하였다. 이 새로운 장비를 이용하여 수소와 산소 원자 띠 (atomic lines)를 시간에 따른 신호로 측정하였고 이 신호를 계산하여 이상상태 스프레이의 연료 농도를 측정하였다. 신호의 세기 비와 당량비의 관계를 나타내는 보정곡선을 구축하였고 이를 실제 스프레이에 적용하여 위치에 따른 국소 당량비를 측정하였다.

스프레이 화염에서 당량비와 액체연료의 특성은 점화의 성질과 화염의 안정성 및 배기가스를 결정한다. 그렇기 때문에 스프레이 연료를 사용하는 극초음속 운반체에서는 이상상태 유동의 특성을 매우 빠르게 파악할 수 있는 방법이 필요하다. 이번에 개발한 LIBS plug을 엔진에 직접 장착한다면 엔진 내부의 유동을 손쉽게 측정할 수 있고 이를 이용하여 연소특성을 진단할 수 있다. 또한 매우 빠르게 신호를 수집하고 데이터를 처리할 수 있기 때문에 연료의 중요한 파라미터들을 실시간으로 제어할 수 있는 환경이 주어진다. 더 나아가 이러한 기능들을 응용한다면 극초음속 운반체 뿐 아니라 다양한 연소 환경에서 유동의 특성들을 조절할 수 있는 피드백 제어 시스템을 구축할 수 있을 것이다. 이러한 것들을 이용한 피드백 시스템은 다양한 엔진에서 최적의 연소상태를 유지할 수 있는 도구로 사용될 수 있을 것이다.

참고문헌

- [1] S. Joshi, D.B. Olsen, C. Dumitrescu, P.V. Puzinauskas, A.P. Yalin, Laser-induced breakdown spectroscopy for in-cylinder equivalence ratio measurements in laser-ignited natural gas engines, *Applied spectroscopy*, 63 (2009) 549-554.
- [2] P. Stavropoulos, A. Michalakou, G. Skevis, S. Couris, Laser-induced breakdown spectroscopy as an analytical tool for equivalence ratio measurement in methane - air premixed flames, *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 60 (2005) 1092-1097.
- [3] P. Stavropoulos, A. Michalakou, G. Skevis, S. Couris, Quantitative local equivalence ratio determination in laminar premixed methane - air flames by laser induced breakdown spectroscopy (LIBS), *Chemical physics letters*, 404 (2005) 309-314.
- [4] A.E. Majd, A.S. Arabanian, R. Massudi, M. Nazeri, Spatially Resolved Laser-Induced Breakdown Spectroscopy in Methane - Air Diffusion Flames, *Applied spectroscopy*, 65 (2011) 36-42.
- [5] T.X. Phuoc, F.P. White, Laser-induced spark for measurements of the fuel-to-air ratio of a combustible mixture, *Fuel*, 81 (2002) 1761-1765.
- [6] T.X. Phuoc, Laser-induced spark for simultaneous ignition and fuel-to-air ratio measurements, *Optics and Lasers in Engineering*, 44 (2006) 520-534.

- [7] A. Michalakou, P. Stavropoulos, S. Couris, Laser-induced breakdown spectroscopy in reactive flows of hydrocarbon-air mixtures, *Applied Physics Letters*, 92 (2008) 081501.
- [8] K.E. Eseller, F.Y. Yueh, J.P. Singh, Laser-induced breakdown spectroscopy measurement in methane and biodiesel flames using an ungated detector, *Applied optics*, 47 (2008) G144-G148.
- [9] J. Kiefer, J. Tröger, Z. Li, M. Aldén, Laser-induced plasma in methane and dimethyl ether for flame ignition and combustion diagnostics, *Applied Physics B: Lasers and Optics*, 103 (2011) 229-236.
- [10] S. Zhang, X. Yu, F. Li, G. Kang, L. Chen, X. Zhang, Laser induced breakdown spectroscopy for local equivalence ratio measurement of kerosene/air mixture at elevated pressure, *Optics and Lasers in Engineering*, 50 (2012) 877-882.
- [11] B. McGann, C.D. Carter, T. Ombrello, H. Do, Direct spectrum matching of laser-induced breakdown for concentration and gas density measurements in turbulent reacting flows, *Combustion and Flame*, 162 (2015) 4479-4485.
- [12] H. Do, C.D. Carter, Q. Liu, T.M. Ombrello, S. Hammack, T. Lee, K.-Y. Hsu, Simultaneous gas density and fuel concentration measurements in a supersonic combustor using laser induced breakdown, *Proceedings of the Combustion Institute*, 35 (2015) 2155-2162.
- [13] M. Kotzagianni, R. Yuan, E. Mastorakos, S. Couris, Laser-induced

breakdown spectroscopy measurements of mean mixture fraction in turbulent methane flames with a novel calibration scheme, *Combustion and Flame*, 167 (2016) 72-85.

- [14] G.C. Gebel, T. Mosbach, W. Meier, M. Aigner, Optical and spectroscopic diagnostics of laser-induced air breakdown and kerosene spray ignition, *Combustion and Flame*, 162 (2015) 1599-1613.
- [15] S.H. Lee, H. Do, J.J. Yoh, Simultaneous optical ignition and spectroscopy of a two-phase spray flame, *Combustion and Flame*, 165 (2016) 334-345.
- [16] S.H. Lee, H.T. Hahn, J.J. Yoh, Towards a two-dimensional laser induced breakdown spectroscopy mapping of liquefied petroleum gas and electrolytic, *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 88 (2013) 63-68.
- [17] C. Letty, A. Pastore, E. Mastorakos, R. Balachandran, S. Couris, Comparison of electrical and laser spark emission spectroscopy for fuel concentration measurements, *Exp. Therm. Fluid Sci.* 34 (2010) 338 - 345.
- [18] M. Kotzagianni, S. Couris, Femtosecond laser induced breakdown for combustion diagnostics, *Appl. Phys. Lett.* 100 (2012) 264104.
- [19] N. Glumac, G. Elliott, The effect of ambient pressure on laser-induced plasmas in air, *Optics and Lasers in Engineering*, 45 (2007) 27-35.

Abstract

A study of liquid-fueled flame using a portable laser-induced plasma spectroscopy device

Hyunwoo Kim

Department of Mechanical and Aerospace

Engineering

The Graduate School

Seoul National University

Measuring laser ignition probability and flow properties in two-phase flow have performed using laser-induced plasma spectroscopy (LIBS). We demonstrated that ignition probability increased in liquid hydrocarbon-fueled spray as C_2 molecular band peak got higher. Feedback algorithm was devised using such a result to find location of higher ignition probability. A portable device composed of photodiodes and bandpass filters was developed to measure the local equivalence ratio instead of using laboratory standard LIBS system consisting of ICCD camera and a spectrometer. Bandpass filters with $656\text{ nm} \pm 10\text{ nm}$ and $780\text{ nm} \pm 10\text{ nm}$ on two fast photodiodes were used to acquire H and O atomic emission signals, respectively and the equivalence

ratio was determined by calculating intensity ratio of each signal. To exclude the strong continuum emission from the early stage plasma, the H and O signals were captured with a time delay of 250 ns up to 1 μ s after the laser firing. It was found that the H/O signal intensity ratio is a strong function of fuel concentration, thus a calibration curve for concentration measurements was established and validated using conventional LIBS. The proposed scheme of measuring local equivalence ratio of spray flames using a bundled layout of multiple LIBS plugs alongside the combustor wall may be the simplest and highly robust diagnostics, especially under harsh combustion conditions associated with air-breathing engines.

Keywords : Laser-Induced Breakdown Spectroscopy(LIBS), Laser ignition probability, LIBS plug, Plasma emission

Student Number : 2015-22734